

レーダ物体像再構成のための波数領域 2次元内挿法

正員 古澤 明[†] 正員 若山 俊夫^{††}
 正員 佐藤 亨^{††} 正員 木村 馨根^{††}

Two-Dimensional Interpolation in the Wavenumber Domain for Radar Image Reconstruction

Akira FURUSAWA[†], Toshio WAKAYAMA^{††}, Toru SATO^{††}
 and Iwane KIMURA^{††}, Members

あらまし 回折トモグラフィ法を用いた2次元レーダ物体像再構成において観測方向や走査範囲が限定された場合にはデータの欠損が大きな問題となる。この欠損を波数領域において内挿する手法を提案した。物体像として点ターゲットの集合を仮定し、波数空間における観測値と再生像の2乗残差を反復的に最小化する方法を用いて、欠損率が50%程度に及ぶ場合にも良好な像再生が行えることをシミュレーションにより示した。また反復法の初期値を与える方法として自己相関関数を用いた内挿法を提案し、これが高い欠損率や劣悪なSN比に対しても安定に動作することを示した。更にターゲット数の推定を行うための客観的判定基準を提案し、SN比が良い場合には容易に真のターゲット数が判定でき、SN比が悪く微弱な物体像の抽出が困難である場合にも安定な推定が可能であることを明らかにした。

キーワード レーダ、像再生、回折トモグラフィ、2次元内挿法

1. ま え が き

レーダによる物体像の再構成は人工地下埋設管の位置検出、考古学的調査、地質・地下資源調査等さまざまな方面で利用されている^{(1)~(4)}。物体像再構成の代表的適用例である地中レーダでは、現在のところ主にホログラフィおよび合成開口法が用いられている。また、現段階では実用化されていないが、回折トモグラフィ、Distorted Born Iterative法による逆散乱問題に対する解法⁽⁵⁾等の手法も提案されている。ホログラフィでは、データ収集が対象物体から見てある一定方向に限られているため、横方向に対し縦方向分解能が劣る。これに対し、回折トモグラフィでは物体を取り囲むあらゆる方向から観測を行い空間的な情報を増やすことにより、あらゆる方向でホログラフィよりも高い分解能を得ることができる。

しかし、実際の観測では種々の物理的制約があるた

めに、波数領域のデータに欠損が生じ再生像の質が低下する。より質の高い再生像を得るためには欠損データの高精度な内挿法が必要となる。本論文では、波数領域における2次元内挿法として、ターゲット数を限定した反復法による内挿法を提案し、その原理および計算機シミュレーションを用いた特性評価の結果について述べる。

2. 回折トモグラフィ

回折トモグラフィには、照射波の種類によりいくつかの方法が考えられるが⁽⁶⁾、本論文では照射波を円筒波とし送信アンテナと受信アンテナをそれぞれ直線に沿って走査する方法を対象とする。

送受信機の構成を図1に示す。送信アンテナ、受信アンテナはそれぞれ原点から距離 d_t , d_r 離れ x 軸と θ_t , θ_r の角をなす直線 X_t , X_r 上を無限遠から無限遠まで走査する。

k を照射波の波数、 Γ_e を物体の分布関数のフーリエ変換、 E_s を受信信号のフーリエ変換とすると、

$$E_s(\alpha, \beta) = -\frac{k^2 \exp\{j(\sqrt{k^2 - \alpha^2} d_t + \sqrt{k^2 - \beta^2} d_r)\}}{4\sqrt{k^2 - \alpha^2} \sqrt{k^2 - \beta^2}} \times \Gamma_e(u_x, u_y) \quad (1)$$

[†] 宇宙開発事業団筑波宇宙センター、つくば市
 National Space Development Agency of Japan, Tsukuba-shi, 305 Japan
^{††} 京都大学工学部、京都市
 Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto-shi, 606-01 Japan

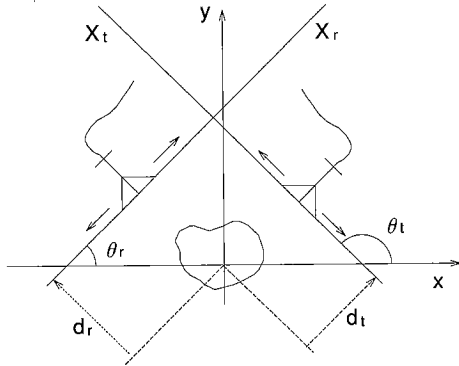


図1 送受信アンテナの走査方法
Fig.1 Scanning pattern of transmitting and receiving antennas.

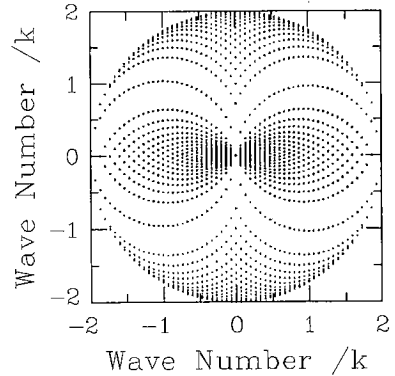


図2 2方向からの送受信で得られるデータ領域. アンテナは半波長間隔で15波長の範囲を走査した場合
Fig.2 Data region obtained by transmit/reception from two directions.

が得られる⁽⁶⁾. 但し, 角 θ の回転行列を $R(\theta)$ として

$$\mathbf{u} = R(\theta_t)\mathbf{u}_\alpha + R(\theta_r)\mathbf{u}_\beta \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = [u_x, u_y]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_\alpha = [\alpha, \sqrt{k^2 - \alpha^2}]^T, \quad \mathbf{u}_\beta = [\beta, \sqrt{k^2 - \beta^2}]^T \quad (4)$$

である. また添字 T は転置行列を表す.

式(2)~(4)より, 送受信アンテナを直線 X_t, X_r 上で走査する場合に得られるデータの軌跡は, 角 θ_t 方向を上向きとする原点中心で半径 k の上半円上に中心をおき半径が k で角 θ_r 方向を上向きとする上半円群であることがわかる. データの得られる領域は送受信ラインの角度 θ_t, θ_r に依存するので, 適当に θ_t, θ_r を変えて複数回観測することにより半径 $2k$ の円内のすべての領域で Γ_e が求められる. この Γ_e を逆フーリエ変換すれば実空間で物体像が再構成される.

波数空間において半径 $2k$ の円内でデータが得られるので, 再生像の分解能はあらゆる方向で $\lambda/2$ となり, 照射波により決定される分解能の限界に一致する.

しかし, 実際に観測を行う場合には測定範囲が制約を受け, その結果データ領域が限定されて再生像の分解能は劣化するのが普通である.

観測における制限としては観測方向, アンテナ走査範囲, アンテナ間隔が考えられる. アンテナ間隔を半波長とすると, 観測方向が物体を挟む対向する2方向に限られる場合でもアンテナ走査範囲を無限とすれば半径 $2k$ の円内の全領域でデータは得られるし, アンテナの走査範囲が20波長程度に限定されてもそれぞれ平行垂直な物体を取り囲む4方向から送受信を行えば全領域でデータは得られる. しかし, 例えばアンテナ間隔が半波長, 走査範囲が15波長の場合, 観測方向

が物体を挟む2方向に限定される場合には得られるデータ領域は図2にドットで示すようになり, 一部の領域に欠損が生じてしまう. また, アンテナの走査範囲の制限はデータの信頼性にも影響を与え, 制限を受けるほど信頼できるデータ領域は減少する. 以降の議論では欠損パターンとして, アンテナ間隔が半波長, 走査範囲が40波長, 送受信方向が2方向または3方向の際に得られるデータの各次元に対し85%を使用するものを標準に考察を進める.

3. 回折トモグラフィのための補間法の性質

回折トモグラフィによる再生像の特徴は波数空間上で得られるデータの領域に大きく依存している. 実空間と波数空間はフーリエ変換の関係にあるので, 実画像の分解能および範囲は, 波数空間で得られるデータの範囲およびサンプリング間隔によって決定される. 波数空間でのデータ範囲は半径 $2k$ の円内であるから, 照射波の波長により決まる. 一方, サンプリング間隔は主に送受信アンテナの走査範囲によって決められる. また, 再生像の質は主としてデータに含まれる雑音と欠損により決められる.

一般に, 送受信アンテナの走査範囲は物理的な制限を受けることが多く, その結果前節で述べたようにデータに多くの欠損が生じ再生像は劣化する. 生じた欠損の取扱い方として最も単純にはすべて0とする方法もあるが, 再生像の質は非常に悪い. そこで, 高精度な実空間画像を得るために, ある基準に従って欠損値を内挿していく方法について考える. ここで対象とす

補間の特徴についてまとめると次のようになる。

- (1) データは実空間と波数空間の両方において複素量である。
- (2) データは2次元である。
- (3) 欠損は点在するので補間は外挿ではなく内挿である。
- (4) 波数空間においてデータはいくつかの正弦波の重ね合せからなっている。すなわち、その逆フーリエ変換はいくつかの δ 関数の和からなっている。

4. 限定ターゲット法

4.1 原理

最初にデータに雑音が含まれない場合について考える。この場合、指導原理として波数空間での観測点における観測値と推定値の残差2乗和を最小にする。

を用いる。本論文で対象としている補間問題は、前章で述べたようにデータがいくつかの正弦波の和からなることを前提とする。このような性質をもった類似の補間問題に対して、固有値解析法では正弦波信号の数を推定して限定を加えることにより成功を収めている⁽⁷⁾。そこで固有値解析法に習い、観測値の拘束のほかに正弦波の数を限定するという指針を更に加えることにする。すなわち、二つ目の指導原理として

実空間でのターゲットの数を必要最小限にとどめ、ターゲットが存在しないとされた点の値は0とする。

を用いることにする。後者の条件により波数空間のすべての点に対してとり得る値に制限を与え、その条件下で前者の条件を満たす解を求めていくことになる。

アルゴリズムはターゲットの数、位置、値に関する3重ループからなる反復法となる。数に関するループが最も外側で、位置、値に関するループの順に内側になる。位置と値の推定は密接に関連しているので、まずターゲットの数は既知であると仮定してこれらを推定し、これを与えるターゲット数を変えて繰り返す。

4.1.1 ターゲットの値、位置の決定

ターゲットの値と位置に関する決定法のアルゴリズムをまとめると次のようになる。但し、ターゲット数 N_{tg} は既知とし、以後ターゲットが存在するとされた点を物体点、ターゲットが存在しないとされた点を背景点と呼ぶ。

- (1) 初期値に対し絶対値の大きい方から N_{tg} 点を

物体点として選び出す。背景点の値は0に固定する。

- (2) 実空間の物体点の値だけを可変として、波数空間の観測点で観測値と推定値の残差2乗和が最小となる解を反復的に求める。解が収束したところで次のステップへ移る。但し、前回のステップ2の結果と収束値が変化しない場合にはアルゴリズムを終了する。
- (3) 波数空間で値を観測値に一致させる。
- (4) 実空間で値の大きい方から N_{tg} 点を物体点として選び直しステップ2へ戻る。

ステップ2の最小2乗解を求めるアルゴリズムを定式化すると

$$I = \sum_{i=1}^M \left| m_i - \frac{1}{N_{it}^2} \sum_{k=1}^{N_{it}^2} f_k \exp[-2\pi j(u_i x_k + v_i y_k)] \right|^2 \tag{5}$$

の最小化問題となる。ここで、

- f_k : 実空間での分布関数 (求める変数)
- m_i : 波数空間での観測値
- M : 観測点の数
- u_i, v_i : 各観測点に対応する波数
- N_{iu} : 1次元方向の画素数

である。以後、複素数値の実部、虚部を上付添字の (r) , (i) で表すことにする。 I を $f_i^{(r)}, f_i^{(i)}$ で偏微分してそれぞれ0とおくことにより

$$\begin{aligned} f_i^{(r)} &= \frac{1}{p_{i,l}} \left\{ d_l N_{it}^2 - \sum_{k=1}^{k=l} (p_{l,k} f_k^{(r)} - q_{l,k} f_k^{(i)}) \right\} \\ f_i^{(i)} &= \frac{1}{p_{i,l}} \left\{ b_l N_{it}^2 - \sum_{k=1}^{k=l} (q_{l,k} f_k^{(r)} + p_{l,k} f_k^{(i)}) \right\} \end{aligned} \tag{6}$$

が得られる。但し、 $d_l, b_l, p_{l,k}, q_{l,k}$ は

$$\begin{aligned} d_l &= 2 \sum_{i=1}^M \left[m_i^{(r)} \cos\{2\pi(u_i x_l + v_i y_l)\} \right. \\ &\quad \left. - m_i^{(i)} \sin\{2\pi(u_i x_l + v_i y_l)\} \right] \\ b_l &= 2 \sum_{i=1}^M \left[m_i^{(i)} \cos\{2\pi(u_i x_l + v_i y_l)\} \right. \\ &\quad \left. + m_i^{(r)} \sin\{2\pi(u_i x_l + v_i y_l)\} \right] \\ p_{l,k} &= 2 \sum_{i=1}^M \cos \left[2\pi \{ u_i (x_l - x_k) + v_i (y_l - y_k) \} \right] \\ q_{l,k} &= 2 \sum_{i=1}^M \sin \left[2\pi \{ u_i (x_l - x_k) + v_i (y_l - y_k) \} \right] \end{aligned} \tag{7}$$

で与えられ、 $q_{l,l} = 0$ であることを用いた。式(6)は厳密な連立解ではなく $f_k (k \neq l)$ を定数とみなして行う1次元探索による解であり、1回の計算では正しい解は得られず反復法により収束した値を解とする。この際、物体点に属するすべての l に対し式(6)の解を求めるが、計算順序の偏りによる収束の遅れを防ぐために計算の順番は各イタレーションごとにランダムに並

べ換える方法を用いている。

ステップ2をデータに施すと、波数空間の観測点には真の像に対する波数成分は含まれているが偽の像に対する波数成分は含まれていないので、物体点のうち本当にターゲットが存在する点では値は真の値へ近づき、本当はターゲットが存在しない点では値は0に近づく。同様に波数空間の観測点には真の像に対する波数成分が含まれているため、ステップ3で波数空間の観測値を拘束するとターゲットが存在する点では値が真の値に近づく。ステップ1で選ばれた物体点には誤ったものが含まれているので、ステップ4で物体点を正しいものへ選び直す。ステップ4ではステップ2, 3の性質に従って0に近づいた偽像を物体点から除き、真の値に近づいた真の像を物体点に加える。

アルゴリズムが終了したところで次の数の決定のループへと移る。

4.1.2 ターゲット数の決定

ターゲットの数を決定するためにターゲットおよび雑音(但し、雑音は本節では存在しないとしている)の性質を示すパラメータ $P(N)$ を導入する。 $P(N)$ は次式で与えられる。

$$P(N) = \sum_{i=1}^M \left| m_i - \frac{1}{N u^2} \sum_{k=1}^{N u^2} f_k \exp[-2\pi j(u_i x_k + v_i y_k)] \right|^2 \quad (N=1, 2, \dots, N_u^2) \quad (8)$$

括弧内の N は実空間画像に含まれるターゲット数を表し、 f_k は N 点においてのみ0でない値をとる。 $P(N)$ は直接的には波数空間の拘束点での拘束状況を示す一方で、間接的には実空間画像の再生状況を示すと考えてよい。

$P(N)$ は大きい方から N 個の信号の和に対応するパラメータとなっている。つまり、 $\Delta P(N) = P(N-1) - P(N)$ ($N=2, 3, \dots, N_u^2$) と定義すると $\Delta P(N)$ は $N \leq N_{tg}$ に対しては N 番目に大きいターゲットに対するパラメータとなる。但し、 $\Delta P(N)$ はターゲットの大きさと完全な比例関係にあるわけではないので必ずしも

$$\Delta P(2) \geq \Delta P(3) \geq \dots \geq \Delta P(N_{tg}) \quad (9)$$

の関係があるわけではない。しかし、 $P(N)$ に対しては $P(1) > P(2) > \dots > P(N_{tg})$

$$= P(N_{tg}+1) = \dots = P(N_u^2) = \epsilon \quad (10)$$

の関係が成り立っている。ここで、 ϵ は計算機の精度によって決まる誤差で本来は0となる。 $P(N)$ は1回の計算では一つの N に対するパラメータしか得られないので信号の数を決定するために $N=1, 2, \dots, N_u^2$ の

うち必要な N に対する $P(N)$ を繰り返し計算しなければならない。式(10)よりターゲット数 N_{tg} の決定法は“ N の値を適当な小さい値から順に増やしていき、 $P(N)$ の値が小さくならずほぼ一定値をとるようになったところを $N=N_{tg}$ とする”となる。

4.1.3 初期値

反復法により解を求めるときには、初期値として何を用いるかによりその後の挙動が左右される。一般に、最小化問題では平衡点は求めようとしている点以外にも極小値として点在していると考えられ、不適当な初期値を選択すると解は局所的な極値に収束するおそれがある。従って、初期値としては真の解にできるだけ近いものを用いる必要があり、欠損値をすべて0とするのは適当でない。

ここでは初期値を求める方法として自己相関関数を用いた内挿法(以後、ACF法と呼ぶ)を提案する。少数の正弦波からなる複素データでは各データ間の相関は、主に相互の位置関係に依存し絶対的位置には依存しないので、データに欠損が点在していても自己相関関数は比較的正しく推定できる。従って、自己相関関数を用いて内挿を行えば良い推定ができるものと期待される。

具体的には、

(1) 得られているデータをすべて使って基準となる自己相関関数 $C_{k,l}$ を求める。

(2) 新たに推定するデータも含めて計算される自己相関関数と基準自己相関関数 $C_{k,l}$ ($k=1, \dots, L$; $l=1, \dots, L$) の残差2乗和が最も小さくなるように欠損値を推定していく。

という流れで内挿を行う⁽⁶⁾。基準自己相関関数は初めに得られたものを常に使用し、新しく内挿された点を加えて新たに求め直しはしない。ここで取り扱うような内挿の場合には外挿と異なり新しく計算される内挿点を加えても新しい時間遅れに対する自己相関関数が計算できるわけではなく、ある時間遅れの自己相関関数を計算するためのサンプル数が増えるだけである。

観測値に比べ内挿点は信頼性が低いので、これらを加えて基準自己相関関数の信頼性を低下させてしまうのは適切でない。また、(2)の基準は内挿により決定される点が新しい情報量をなるべく与えないように選ぶことを意味する。これも内挿点を自己相関関数の計算に用いない根拠の一つである。

この方法は反復を行わずに1度の処理で解が得られる上、シミュレーションの結果、物体像を構成する点

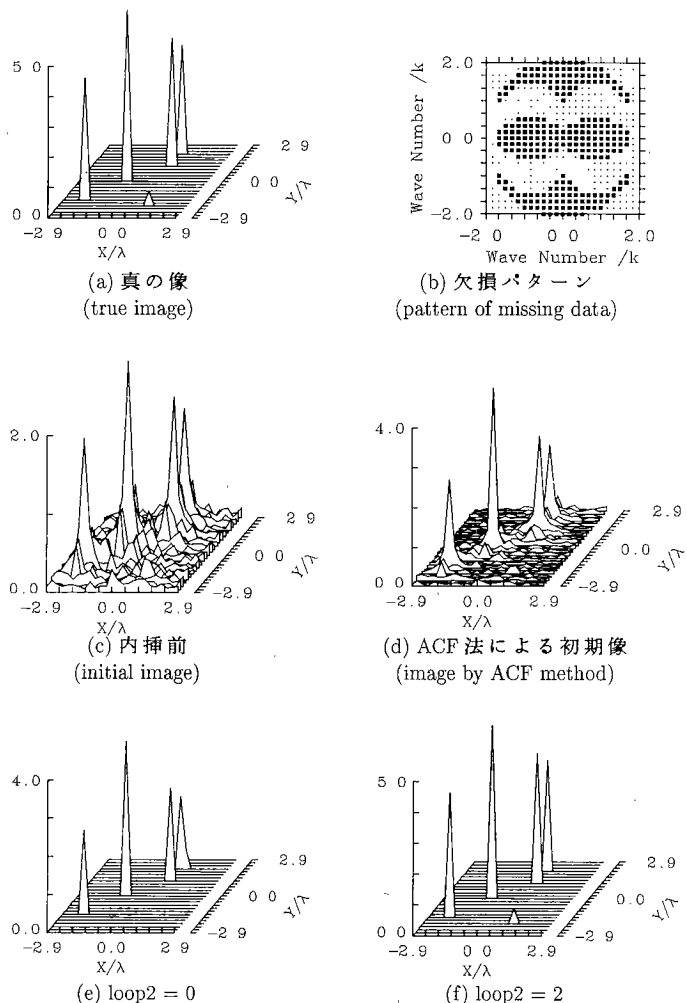


図3 反復法を用いた内挿法による離散点像の再生
 Fig. 3 Retrieval of a discrete-point image using the iterative interpolation.

ターゲットの数が少ないときは真の像に近い結果が得られる。また大きい雑音を含む場合やターゲットの数が比較的多い場合などの条件の悪い物体像に対しても安定に動作して像質を悪化させてしまわないことが確かめられている。そこで、これを反復法の初期値として用いる。

4.2 シミュレーション結果および考察

4.2.1 ターゲットの値、位置の決定

ターゲットの値、位置に関するシミュレーション結果を図3に示す。図3では物体像として(a)のように離散的に分布する5点の点ターゲットからなるものを用いた。波数空間で(b)のように2方向からの送受信により得られる欠損(欠損率58%)を与えた。但し、

図中の大きい点がデータの存在する点を表し、小さい点は欠損を表している。欠損により(c)のようになった物体像に対しACF法を適用すると、(d)に示すように雑音が抑圧され、更にこれを初期値として反復法を繰り返し適用していくと、(e): loop 1=0, loop 2=0を経て(f): loop 1=2, loop 2=2となり真の像が再生される。但し、loop 1, loop 2はそれぞれターゲットの値と位置のループの反復回数である。

真の像への収束の速度は物体像を構成するターゲットの数や配置、あるいは欠損率に依存している。一般に、ターゲット数が増加するほど、また欠損率が増加するほど収束が遅くなる。また、点ターゲットが離散的に分布している場合には集中している場合より速く

収束するという結果が得られている。

4.2.2 ターゲット数の決定

図3のようにターゲット数が少ない場合には推定するターゲット数 N を順次増やしてパラメータ $P(N)$ の減少の傾向を調べれば正しいターゲット数を容易に推定することができる。

ここではターゲット数がより多い場合として、図4に示す25点からなる物体像を考える。図5にターゲット数 N を順に増やして値と位置を推定した場合の $P(N)$ の変化を示す。ここで欠損パターンは、周期的にデータの4分の1が欠損であるものを用いている。図の横軸はターゲット数 N 、縦軸はパラメータ $P(N)$ を示している。図中に9本の線が描かれているが、値の大きい方からターゲットの位置に関するループの1回目から9回目に相当している。値に関するループは2回ずつ行っている。ターゲットは25点からなっており、そのうち4点は他の点より絶対値が2倍大きい。

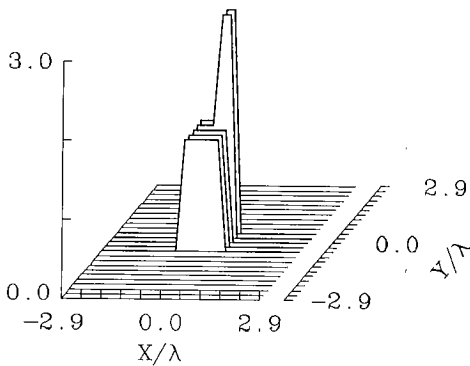


図4 集中して分布する25点からなる物体像
Fig.4 An image of 25 concentrated points.

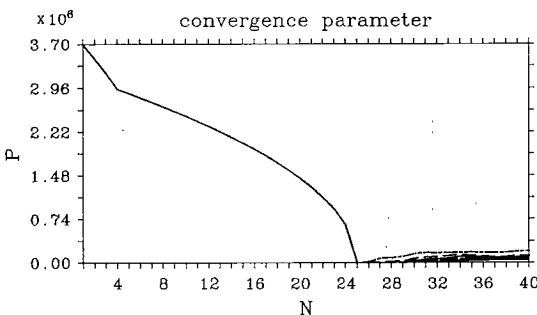


図5 ターゲット数に対する誤差パラメータ $P(N)$ の変化

Fig.5 Variation of the error parameter $P(N)$ vs. the number of target points.

$\Delta P(N)$ の変化が $N=4$ のところで明りょうに見られるが、これは $N \leq 4$ では $\Delta P(N)$ が $2\sqrt{2}$ の絶対値をもつターゲットに対応しているのに対し、 $N > 4$ では $\Delta P(N)$ が $\sqrt{2}$ の絶対値をもつターゲットに対応していることに相当する変化である。但し、 $\Delta P(N)$ は $N=24$ 付近でも大きくなっており、式(9)が必ずしも成り立っていないこともわかる。 $N=N_{lg}$ で $P(N)$ は急速に0に近づいている。また、 $N > N_{lg}$ で $P(N)$ はやや大きな値をとっているが、これは冗長な自由度が増えるために収束の速度が落ち、9回程度の反復ではまだやや大きな値をとっているためであり、最終的には $N=N_{lg}$ のときと同じ値に収束すると思われる。実際の計算では反復回数に限りがあるので N_{lg} の決定は“ N の値を適当な小さい値から順に増やしていき $P(N)$ の値が小さくならずほぼ一定値をとるか、あるいは極小となるところを $N=N_{lg}$ とする”に変更する必要がある。

別の物体像、欠損パターンに対しても $P(N)$ には同様な傾向が見られる。

4.3 雑音を含むデータに対する内挿結果

前節まではデータに雑音が含まれない場合について検討を行ってきたが、本節では雑音を含むデータに対する検討を行う。SN比は最小ターゲットのパワーを S_{min} 、雑音の平均を N_{av} として

$$SN = 10 \log_{10} \frac{S_{min}}{N_{av}} \quad (11)$$

で定義する。まず、SN比に対する像再生の限界について理論的考察を行う。

仮に波数空間のデータに欠損が存在しないとすると、雑音が存在する場合に物体点の選択が正しく行われる限界は、背景点における雑音の最大値が雑音の加えられた最小信号の最小値を超えないことである。

雑音の振幅の確率密度がレイリー分布でその分散が σ^2 である場合、雑音のパワーは χ^2 分布

$$f_1(\chi^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\chi^2\right), \quad 0 \leq \chi^2 < \infty \quad (12)$$

となる。波数空間上の N_w 点のうち、ある点の値を $a_1\sigma$ としたとき、他の (N_w-1) 点すべてが $a_1\sigma$ 以下である確率、すなわち $a_1\sigma$ が最大値となる確率は

$$P_1(a_1) da_1 = N_w f_1(a_1\sigma) \left[\int_{-\infty}^{a_1\sigma} f_1(x) dx \right]^{N_w-1} da_1 \quad (13)$$

また、振幅 A の信号に雑音を加えられている場合、振幅の確率密度はライス・仲上分布となる。従ってそのパワーの確率密度は

$$f_2(R^2) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{R^2+A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{R^2}A}{\sigma^2}\right) \quad (14)$$

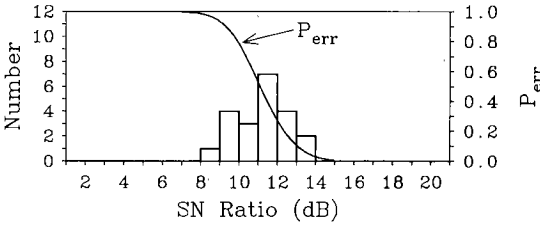


図6 雑音を含むデータに対する像再生限界
Fig. 6 Retrieval limit for data with noise.

となる。但し I_0 は 0 次の変形ベッセル関数である。
式(13)と同様にして、 N_w 点のうち最小値が $\alpha_2\sigma$ と
なる確率は

$$P_2(\alpha_2)d\alpha_2 = N_w f_2(\alpha_2\sigma) \left[\int_{\alpha_2\sigma}^{\infty} f_2(x) dx \right]^{N_w-1} d\alpha_2 \quad (15)$$

となる。

$P_1(\alpha_1)$ と $P_2(\alpha_2)$ の確率密度が同一の値となる点を β
とすると、背景点の最大値が最小信号を上回り誤検出
される確率 P_{err} は

$$P_{err} = \frac{\int_{\beta}^{\infty} P_1(\alpha_1) d\alpha_1 + \int_0^{\beta} P_2(\alpha_2) d\alpha_2}{\int_0^{\infty} P_1(\alpha_1) d\alpha_1 + \int_0^{\infty} P_2(\alpha_2) d\alpha_2} \quad (16)$$

となる。

図6の実線はこの P_{err} を 1 点の大きなターゲット
と 4 点の小さなターゲットからなる物体像に対して描
いたものである(グラフ右側の縦軸目盛)。更に、欠損
パターンとして図5の場合と同じものを与え、21 通り
の雑音を加えたデータに対する再生限界のシミュレ
ーション結果をヒストグラムで示した。このヒストグラ
ムは、21 通りのうちで再生限界が横軸に示す SN 比と
なる個数を表示している(グラフ左側の縦軸目盛)。シ
ミュレーション結果は欠損が存在するにもかかわらず再
生限界となる SN 比の値が理論曲線よりわずかに大き
いだけであることを示す。これより欠損が存在してい
ても像再生限界があまり劣化せず、限定ターゲット法
が雑音を含むデータに対しても有効に動作することが
わかる。

次に雑音を含む場合のパラメータ $P(N)$ の変化につ
いて検討する。雑音が含まれる場合は、 $\Delta P(N)$ は $N \leq$
 N_{lg} ではほぼ N 番目に大きい信号に相当するが、 $N >$
 N_{lg} では雑音の分散 σ^2 に比例した数値となる。従っ
て、式(10)は

$$P(1) > P(2) > \dots > P(N_{lg}) > P(N_{lg}+1) > \dots > P(N_{lg}^2) \\ \Delta P(N_{lg}+1) \cong \dots \cong \Delta P(N_{lg}^2) \propto \sigma^2 \quad (17)$$

と変形される。

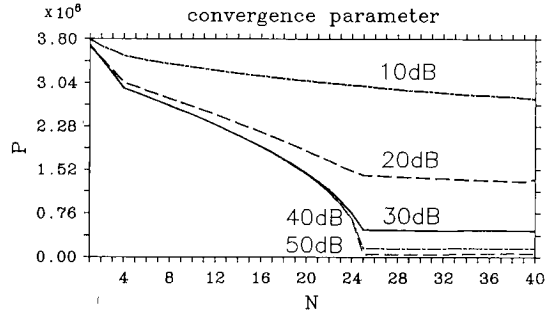


図7 雑音を含むデータに対する $P(N)$ の変化
Fig. 7 Variation of $P(N)$ for data with noise.

雑音を含むデータに対するパラメータ $P(N)$ の変化
のシミュレーション結果は図7のようになる。物体像、
欠損パターンが図5と同じものに対するシミュレシ
ョン結果である。図中には SN 比が 10 dB から 50 dB
まで 10 dB 刻みのデータが描かれている。すべて
loop 1=2, loop 2=9 の時点での値でほぼ収束した状
態の値である。 $P(N)$ は SN 比が 20 dB より大きいと
きは収束レベルこそ高いものの雑音が存在しないとき
と同じように $N=N_{lg}$ までは減少しそれ以降ほぼ一定
値をとっている。ここで $N > N_{lg}$ の部分をよく見るとわずかな
がら減少を続け、途中から増加し始めている。微小な
減少部分は雑音に相当する式(17)の微小量 $\Delta P(N)$ に
相当している。また、その後再び上昇し始めているの
は収束速度が落ちまだ収束し切っていないためであ
る。これに対し、10 dB の場合は雑音とターゲットとが
ほとんど識別不可能となっているため、 $P(N)$ の変化
は雑音を含まないときのような変化を示さず単調減少
をしている。しかし、このアルゴリズムは値の大きい
ターゲットから選び出すようになっているので、適当
なターゲット数のところで反復を打ち切れれば大きい方
から所望の分だけターゲットを選び出すことができ
る。

5. むすび

本論文では波数領域の 2 次元データに対する内挿法
について論じた。具体的な適用対象としては回折トモ
グラフィによる像再生を念頭においている。回折トモ
グラフィでは観測範囲が制限を受けるとデータに欠損
が生じ再生像が劣化してしまう。そこで、観測対象と
する物体が比較的少数の点ターゲットからなっている
という条件のもとで欠損値を内挿する方法として限定

ターゲット法を提案し、その有効性を示した。

限定ターゲット法の初期値として用いる ACF 法は、物体像が少数の点ターゲットからなっている場合には非常に有効に動作する。また、多くの点ターゲットからなっている場合や雑音が含まれる場合にも像質を劣化させず安定な動作をすることが確かめられている。

限定ターゲット法は実空間でのターゲット数を制限することにより非常に高い像再生能力を実現している。雑音を含むデータに対しても理論的に推定される再生限界に近い再生能力が示され、有効に動作することが確認された。また、雑音が含まれていても、SN 比がよい場合は雑音が含まれない場合と同様に正しいターゲット推定が可能であることがわかった。SN 比が悪く雑音と信号の識別がつかない場合でも、限定ターゲット法は絶対値の大きい方からターゲットを選び出すアルゴリズムであるので、ターゲット数を適当なところで打ち切れば信号を大きい方から所望の数だけ選び出すことができる。

文 献

- (1) 鈴木 務, 荒井郁男, 堀田展弘, 堀越義明, 堀田富夫, 木下 晃, 野津俊光: “地中探索レーダシステム”, 信学技報, **SANE79-40** (1979).
- (2) 荒井郁男, 鈴木 務: “地中探査レーダ (その 2) —コンプレッション型”, 信学技報, **SANE83-8** (1983).
- (3) 阿部友行, 坂西昇一, 金光保雄, 市村泰彦: “地中レーダによる埋設物の探査とトンネル機械への応用例”, 地下電磁計測ワークショップ論文集, pp. 39-44 (1989).
- (4) Daniels D. J., Gunton D. J. and Scott H. F.: “Introduction to subsurface radar”, Proc. IEE, **135**, 4 (Aug. 1988).
- (5) Chew, W. C.: “Waves and Fields in Inhomogeneous Media”, Van Nostrand Reinhold, 547-557 (1990).
- (6) 永井啓之亮: “超音波ホログラフィ”, 日刊工業新聞社, 3 章, pp. 83-120 (1989).
- (7) Tufts D. W., Kumaresan R.: “Estimation of Frequencies of Multiple Sinusoids: Making Linear Prediction Perform Like Maximum Likelihood”, Proc. IEEE, **70**, 9 (Sep. 1982).
- (8) 古澤 明, 若山俊夫, 佐藤 亨, 木村磐根: “レーダ物体像再構成のための波数領域 2 次元内挿法に関する一考察”, 信学技報, **SANE90-62** (1991).

(平成 4 年 8 月 13 日受付, 11 月 2 日再受付)



古澤 明

平 1 京大・工・電気第二卒, 平 3 同大大学院修士課程了。在学中は VHF レーダによる軌道運動物体のリモートセンシングならびにレーダ物体像再構成の研究に従事。現在, 宇宙開発事業団筑波宇宙センター機器・部品開発部勤務。対流圏微量気体の 3 次元分布測定器の開発に従事。



若山 俊夫

平 2 京大・工・電気第二卒, 平 4 同大大学院修士課程了。同年同博士課程に進学, 現在に至る。VHF レーダによる軌道運動物体のリモートセンシングならびにレーダ物体像再構成の研究に従事。



佐藤 亨

昭 51 京大・工・電気第二卒, 昭 53 同大大学院修士課程了。昭 56 同博士課程研究指導認定退学。同年日本学術振興会奨励研究員, 昭 58 年京大超高層電波研究センター助手, 昭 63 工学部講師, 現在に至る。VHF レーダによる降雨, 中層・超高層大気, 軌道運動物体のリモートセンシングならびにレーダ信号処理の研究に従事。地球電磁気・地球惑星圏学会, 日本航空宇宙学会, 米国気象学会各会員。工博。昭 61 地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞受賞。



木村 磐根

昭 30 京大・工・電気卒, 昭 32 同大大学院修士課程了。昭 35 同博士課程単位取得退学。同年京大工学部助手。昭 37 同助教。昭 46 同教授, 現在に至る。昭 39~40 米国スタンフォード大・電波科学研究所研究員。昭 56~現在文部省宇宙科学研究所客員教授。平成 1~現在郵政省通信総合研究所客員研究員。超高層プラズマ波動の伝搬, 波動-粒子相互作用, VHF レーダによる降雨, 電離層, 軌道運動物体のリモートセンシングの研究に従事。電気学会, 地球電磁気・地球惑星圏学会各会員。工博。昭 33 稲田記念賞, 昭 36 田中館賞受賞。